冰冻圈灾害特征、影响及其学科发展展望

王世金[1] 温家洪[2*]

1 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室 兰州 730000
2 上海师范大学 环境与地理科学学院 上海 200234

摘要 冰冻圈灾害包括陆地冰冻圈灾害、海洋冰冻圈灾害和大气冰冻圈灾害，冰冻圈灾害分布广泛，对社会造成的损失和影响巨大。气候变暖导致冰冻圈灾害的发生频率和强度越来越高，使冰冻圈及其影响地区消除贫困、气候变化减缓与适应，以及经济社会可持续发展面临严峻挑战。早期，冰冻圈灾害学主要以单灾种的致灾事件、灾害影响和防治研究为主，且多集中于雪崩、冰湖溃决和冰川泥石流灾害。20 世纪 80 年代以来，冰冻圈灾害学研究范畴扩大，冻土灾害、海冰灾害、冰凌灾害等得到广泛关注和深入研究。近 10 年，伴随冰冻圈科学体系的建立、完善，冰冻圈灾害学学科体系正在孕育发展，且在冰冻圈灾害风险、影响与适应方面进展显著。基于已有研究，文章详细阐述了冰冻圈灾害学学科内涵，评述了冰冻圈灾害时空特征及其综合影响，进而提出了未来冰冻圈灾害学学科建设和发展的建议。

关键词 冰冻圈灾害，学科建设，未来展望

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20200301002

2008 年初，中国南部和中部 19 个省份低温、雨雪和冰冻共同交织，持续 20 多天，造成了中国近 50 年以来最严重的雨雪冰冻灾害。2018 年 10 月16日，雅鲁藏布江中下游米林县发生冰崩，冰崩及其携带的冰碛物形成冰崩堰塞湖，导致雅鲁藏布江断流、水位上涨；同年 10 月 29 日，该地再次发生冰崩堵江事件，引起了广泛关注。类似的冰冻圈灾害种类繁多，发生频繁，分布广泛，造成的损失和影响巨大。在全球变暖的趋势下，冰冻圈灾害发生的频数和强度有增强趋势，已成为全球常见的自然灾害。频发的冰冻圈灾害严重影响了冰冻圈承灾区居民的生命和财产安全，以及冰冻圈地区的工农业与畜牧业、交通运输、基础设施、旅游发展乃至国防安全，使承灾区社会经济系统遭受破坏。特别是冰冻圈承灾区往往是地处偏远的高

*通讯作者
资助项目：国家自然科学基金委重大项目（41690143），中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA19070503）
修改稿收到日期：2020年3月24日

寒地区和经济欠发达地区，贫困人口比例高，抵御自然灾害的能力差，冰冻圈灾害防治已成为冰冻圈地区消除贫困、减缓与适应气候变化影响，以及推动经济社会可持续发展面临的重要问题。

基于冰冻圈灾害学在灾害风险科学和可持续发展中的重要性，本文扼要阐述冰冻圈灾害学内涵，介绍冰冻圈灾害类型、时空特征、综合影响及其适应性管理策略，提出未来冰冻圈灾害学学科建设的一些建议。

1 冰冻圈灾害学的产生与发展

纵观国内外冰冻圈灾害学的发展，可以看出，早期冰冻圈灾害学主要以单灾种的致灾事件、灾害影响和防治研究为主，且多集中于雪崩、冰湖溃决和冰川泥石流灾害。20世纪80年代以来，冰冻圈灾害学研究范畴在扩大，冻土灾害、海冰灾害、冰凌灾害等受到广泛的关注和深入研究。进入21世纪，伴随着技术、方法的提升和对防灾减灾的关注，冰冻圈各类灾害研究也得到了快速发展，研究的深度和广度都有显著的扩展。近些年，伴随冰冻圈科学、灾害风险科学学科的发展，以及冰冻圈与可持续发展的迫切需要和相关技术方法的推动，冰冻圈灾害学在灾害综合影响、成灾机理、风险特征、风险评估、灾害预警、风险管理等诸多方面，有了较为深入的研究和认识，表明冰冻圈灾害学科正在孕育发展、萌发兴起。

冰冻圈灾害学旨在综合分析冰冻圈灾害与风险时空特征及影响，明晰其成因机理和致灾过程，并据此确定科学有效的防灾减灾对策，最终达到降低灾害风险、减轻灾害损失、增强冰冻圈社区恢复力和实现冰冻圈区域可持续发展的目的。冰冻圈灾害学具有理学、工学与社会科学的三重属性，是防灾、减灾、救灾实践的基础。冰冻圈灾害科学的研究对象为冰冻圈灾害风险系统，该系统是由冰冻圈的孕灾环境、致灾事件、承灾体暴露和脆弱性共同组成的地球表层系统。

冰冻圈灾害风险是致灾事件（hazard）、暴露（exposure）、脆弱性（vulnerability）3个要素综合的结果。在图1中，如果用三角形的面积来表示冰冻圈灾害风险的大小，可知其风险大小取决于冰冻圈致灾事件的强度和发生频率（通常称为致灾事件的危险性）、承灾体的暴露程度及其脆弱性高低。

冰冻圈孕灾环境包括自然与非自然（社会-经济）要素，是风险及其三要素时空动态变化的驱动因子（图1）。多圈层的相互作用及其演化，特别是气候变化、环境退化、人口迁徙、城市化和经济发展等是冰冻圈灾害风险动态变化的重要驱动因子。

冰冻圈灾害学既注重基础理论，也强调实际应用，其研究内容随着冰冻圈科学和灾害风险科学的发展不断深化和丰富。基础理论上，冰冻圈灾害学主要研究冰冻圈这一独特圈层的灾害风险系统、机理和过程，研究冰冻圈灾害与风险，以及风险要素包括致灾事件、暴露度、脆弱性的特征、类型、分布、变化、损失与影响，以及它们之间的相互作用。同时，冰冻圈灾害学还探究冰冻圈灾害风险产生的根源，及其气

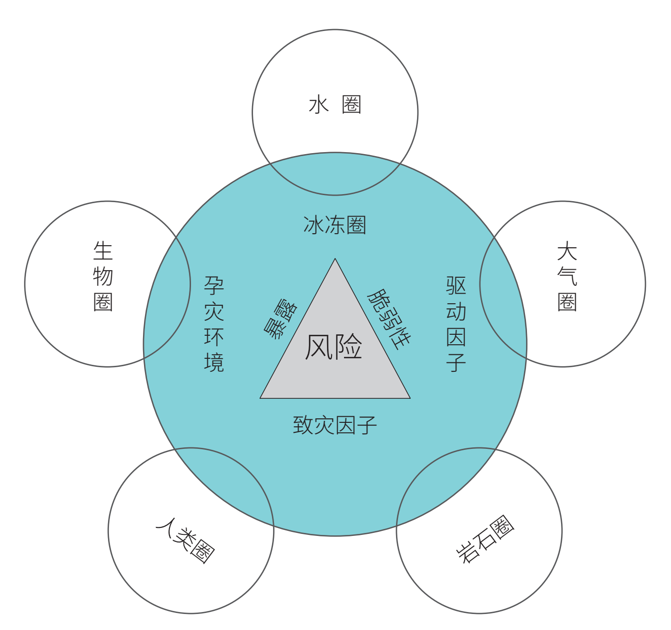


图1　冰冻圈灾害风险系统

候与非气候（社会-经济）因子对冰冻圈灾害形成的驱动机制。技术方法上，冰冻圈灾害学主要内容涉及灾害与风险的观测、统计、分析、建模、预估、预报与预警，以及灾害风险地图编制与区划、灾害风险信息集成与管理等。目前，致灾事件的危险性、承灾体及其暴露和脆弱性、损失与风险分析等灾害风险分析的技术方法已得到广泛应用。应用实践上，冰冻圈灾害学强调开展灾害风险与应急管理，冰冻圈气候变化适应研究。具体内容包括：可接受风险水平评价、工程与非工程性措施及其成本-效益分析，不确定性情景下的冰冻圈灾害风险决策、重大工程与基础设施保护、国土空间规划、弱势群体的社会保障，冰冻圈气候变化适应、灾害风险治理，以及冰冻圈承灾区恢复力建设与可持续发展。冰冻圈灾害应急管理包括灾害预警、备灾、应急响应与救灾，以及恢复重建等内容。

2 冰冻圈灾害的时空特征

（1）按致灾事件所属冰冻圈类型，冰冻圈灾害可分为陆地冰冻圈灾害、海洋冰冻圈灾害和大气冰冻圈灾害。陆地冰冻圈灾害包括冰崩、冰湖溃决、冰川洪水、冰川泥石流、冻融、雪崩、积雪洪水、风吹雪、冰凌/凌汛、水资源短缺灾害；海洋冰冻圈灾害包括冰山、海冰、海岸侵蚀、海平面上升等；大气冰冻圈灾害包括暴风雪、冰雹、雨雪冰冻、霜冻和牧区雪灾等。这些灾害不同程度地影响着全球交通、电力、水利、通讯等基础设施和农林牧渔产业、冰雪旅游、文化景观以及人民的生命财产安全（图2）。

（2）冰冻圈不同类型灾害发生及其影响的时空尺度存在差异。冰冻圈灾害的发生具有瞬时性，一些灾害的发生则具有周期性或更长时间尺度；一些灾害的发生可能是局地的，一些灾害的发生则具有区域乃至更大尺度。在冰冻圈灾害中，雪灾是波及范围最广的灾种，包括雪崩、风吹雪、暴风雪、牧区雪灾、融雪洪水、冰冻雨雪等，各灾种相互作用、相互影响。这些灾害常危及承灾区农牧业生产、区域交通等经济社会的发展（图2）。冰崩、雪崩、冰湖溃决发生灾害时间短暂，属突发性灾害，预警与防范较难。冻融灾害、水资源短缺、海平面上升等冰冻圈灾害发生时间较长，属渐发或缓发性灾害，从长远来看，可能会造成更大危害，但受到关注往往较少[1]。

（3）陆地冰冻圈灾害主要集中在环北极国家、中高纬度山地国家。其中，冰/雪崩灾害多发生在北半球中高纬度地区的山区[2]。冰湖溃决洪水/泥石流灾害主要发生在兴都库什-喜马拉雅山、念青唐古拉山、加拿

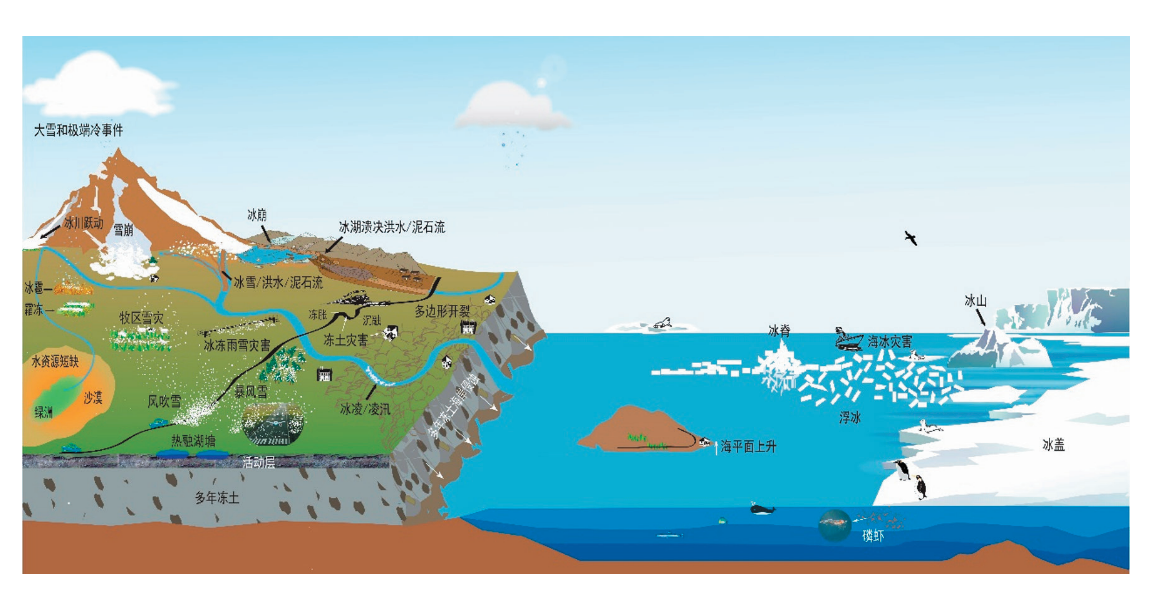


图2 陆地、海洋和大气冰冻圈主要灾种空间分布

大西南海岸山脉、南美安第斯山区、阿尔卑斯山、冰岛等地[3-5]。冰川跃动灾害主要发生在挪威斯瓦尔巴群岛、俄罗斯新地岛、冰岛和阿拉斯加、喀喇昆仑山、帕米尔高原[6,7]。冻融灾害主要发生在环北极、青藏高原、中国东北等多年冻土区[8]。冰雪洪水主要发生在中亚干旱区。

（4）海洋冰冻圈灾害主要集中在沿海国家和沿海低地。冰山灾害主要集中在格陵兰周边区域，而海冰灾害则主要集中在环北极沿线国家沿岸地带及中国环渤海区域[9-11]。多年冻土海岸侵蚀主要发生在环北极的俄罗斯西北沿岸的卡宁诺斯半岛—亚马尔半岛—泰拉尔半岛、新西伯利亚群岛沿岸、东西伯利亚海西南海岸地带、美国阿拉斯加北部沿岸、加拿大育空地区北部沿岸地带[12,13]。海平面加速上升被认为是人类社会面临的最重要的风险之一，特别是海岸带社区、沿海城市和低洼小岛屿面临严峻挑战[14]。

（5）大气冰冻圈灾害多发生在中高纬度地区。暴风雪灾害主要发生在美国东北部、加拿大西南部、西北欧和日本；冰雹灾害主要发生在美国中东部、欧洲和非洲中部一些地区；而牧区雪灾则主要发生在中国、蒙古国、高加索牧区[15,16]。低温冰冻雨雪灾害则多发生在中国南方、美国东北部及其他高纬度国家[1]。

3 重大冰冻圈灾害影响分析

（1）陆地冰冻圈失稳常引发雪崩、冰崩、冰川跃动事件；同时，冰冻圈的加速消融，进而引发洪水、泥石流灾害[17,18]。在欧洲和北美，雪崩在2000—2010年期间夺去了大约1 900人的生命[2]。全球已有记录冰湖溃决事件达1 348次，这些事件至少导致欧洲阿尔卑斯山393人死亡，南美洲5 745人死亡，中亚6 300人死亡[19]。1970年以来，北极多数地区多年冻土在变暖，多年冻土层温度升温0.50℃—2.00℃[20]。2010—2030年，因冻融过程对基础设施影响，美国阿拉斯加州将需要额外支出36—61亿美元的基础设施维护费用，且2010—2080年维护费用将上升至76亿美元[21]。

（2）海洋冰冻圈灾害主要影响人类在近海岸和海上活动实施和设施安全运行。2010年以来，中国由海冰灾害造成的直接经济损失高达77亿元人民币，其中辽宁、山东两省受海冰灾害影响较为严重[22]。北极多年冻土海岸约占地球上海岸的34%，其侵蚀速率可高达24 m/a[12]。北极地区每年因海岸侵蚀造成的土地损失约为51 km^2 [13]。冰冻圈和海洋热膨胀引起的海平面上升最大影响毫无疑问是世界各类沿海低洼地区。随着海平面上升，其损害风险可能会显著增加，若不采取有效措施，到21世纪末，其潜在损害可能达到全球国内生产总值的10%[23]。

（3）暴风雪灾害、低温冰冻雨雪灾害、雹灾和霜冻灾害，是大气冰冻圈常见的灾种。2010—2017年，暴风雪多次横扫欧洲，多个国家遭遇罕见暴风雪袭击，导致这些国家交通堵塞、航班取消、电力供应中断，严重影响民众生活。2015年2月美国东北部暴风雪灾害导致东北部6个州进入紧急状态，全美6 000万人受到影响，仅2月26—28日约7 000个航班被取消。2008年，中国冰冻雨雪造成全国19个省、直辖市、自治区及新疆生产建设兵团发生不同程度的灾害。此次灾害，因灾死亡107人，直接经济损失达1 111亿元人民币[24]。

4 冰冻圈灾害学学科发展建议

4.1 深化冰冻圈单灾种成灾机理的认识

成灾机理是提升冰冻圈各类灾害预警、预防和治理的基础。当前气候变暖背景下，冰冻圈失稳风险在增加，冰冻圈各类灾害的发生概率风险同样在增加。同时，冰冻圈不同灾种还具有交叉性或链式效应，如冰雪融水、冰湖溃决可诱发滑坡、泥石流等次生灾害的产生。冰/雪崩、冰川跃动、冰雪融水同样可诱发

滑坡、泥石流的产生，形成的堆积体可堵塞河流，形成堰塞湖，进而对下游构成更大威胁。寒潮则引发低温，低温则导致生物冻害、地面结冰、冰冻雨雪等灾害。因此，未来亟须深化冰冻圈各类灾害乃至灾害链的发育规律、形成过程及其空间分异规律、成灾机理研究；同时，重点研究冰冻圈灾害链的形成及其演化机制。

4.2 加强冰冻圈灾害多灾种风险评估研究

对于冰冻圈灾害，以往主要集中在单灾种风险评估方面，很少涉猎冰冻圈多灾种综合风险评估。未来，应集成冰冻圈各类灾害类型，根据各灾种发生概率、规模和死亡人数，构建冰冻圈灾害综合风险评估体系。在此基础上，借鉴冰冻圈灾害空间分异规律、特点，查明区域冰冻圈灾害的演变过程，辨识冰冻圈不同灾种对不同区域的影响范围、影响程度。根据冰冻圈不同灾种灾损、关联性及相对重要性，利用风险分析、建模、损失评估等方法，系统评估冰冻圈灾害综合风险程度，绘制冰冻圈灾害类型、灾情、灾频、风险等区划图件，以此为基础，提出各区防灾减灾方案或措施。

4.3 强化冰冻圈灾害的综合系统研究

冰冻圈灾害不会独立存在，而是与多种孕灾环境息息相关，如同其他自然灾害一样，常伴随着一种或几种次生灾害。因此，冰冻圈灾害研究需要从系统论角度加深理解由孕灾环境、致灾因子、承灾区环境共同组成的灾害系统结构，审视和考虑冰冻圈灾害的复杂性和系统性。通过运用复杂性与系统科学，对区域冰冻圈灾害相关性、时空变化、耦合性质、承灾区脆弱性和适应性等进行定量而系统研究，在冰冻圈灾害综合风险评估基础上，建立冰冻圈灾害预防与应急体系，加大冰冻圈灾害的备灾和重建等灾后恢复系统，这将有效提升冰冻圈灾害综合风险管控的可操作性和科学性。同时，需要加大提升冰冻圈灾害承灾体抗灾能力的结构性和非结构性措施（或工程和非工程措施）研发[25]。

4.4 健全和完善冰冻圈灾害学学科体系

以往，冰冻圈灾害学往往分属不同学科。例如，冰雹、霜冻灾害研究集中在农业气象领域，暴风雪、冰冻雨雪灾害研究多集中在大气科学领域，海冰灾害、海平面上升造成的灾害则分属海洋科学。如今，冰冻圈灾害学将以往零散的冰冻圈各灾种集成于一体，从冰冻圈圈层角度重新审视其各灾种成灾机理、影响程度、时空分异规律。然而，作为新兴学科，还需在 3 个方面得以健全和完善：① 加强高等教育自然灾害及风险管理相关学科中冰冻圈灾害学学科的建设，提升冰冻圈灾害学在其中的地位。② 要加大国际合作与交流，通过组织相关冰冻圈灾害学术会议、举办高校青年教师培训班，促进冰冻圈灾害学学科内部或学科间的学术交流，造就一批冰冻圈科学的骨干授课教师。③ 布设一些冰冻圈灾害相关的重大项目，带动冰冻圈灾害学的快速发展，凝练学科发展共识和发展战略，为冰冻圈灾害学学科领域发展指引方向。

参考文献

1 王世金, 效存德. 全球冰冻圈灾害高风险区：影响与态势. 科学通报, 2019, 64(9): 891-901.

2 王世金, 任贾文. 国内外雪崩灾害研究综述. 地理科学进展, 2012, 31(11): 1529-1536.

3 Wang S J, Qin D H, Xiao C D. Moraine-dammed lake distribution and outburst flood risk in the Chinese Himalaya. Journal of Glaciology, 2015, 61(225): 115-126.

4 王世金, 汪宙峰. 冰湖溃决灾害综合风险评估与管控：以中国喜马拉雅山区为例. 北京：中国社会科学出版社, 2017.

5 Veh G, Korup O, Walz A. Hazard from Himalayan glacier lake outburst floods. PNAS, 2020, 117(2): 907-912.

6 Mukherjee K, Bolch T, Goerlich F, et al. Surge-type glaciers in the Tien Shan (Central Asia). Arctic Antarctic and Alpine

Research, 2017, 49: 147-171.

7 Kääb A, Leinss S, Gilbert A, et al. Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability. Nature Geoscience, 2018, 11: 114-120.

8 Hjort J, Karjalainen Q, Aalto J, et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure atrisk by mid-century. Nature Communications, 2018, 9: 5147.

9 Mironov Y, Klyachkin S, Benzeman V, et al. Ice Phenomena Threatening Arctic Shipping. Fair Lawn: Backbone Publishing Company, 2012.

10 Kubat I, Fowler C D, Sayed M. Floating ice and ice pressure challenge to ships// Shroder J F, Haeberli W, Whiteman C. Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters. Amsterdam: Elsevier, 2015: 647-676.

11 Shroder J F, Ellis J T, Sherman D J. Coastal and Marine Hazards, Risks, and Disasters. Amsterdam: Elsevier, 2015.

12 Fritz M, Vonk J E, Lantuit H. Collapsing Arctic coastlines. Nature Climate Change, 2017, 7: 6-7.

13 Wright L D, Wei W, Morris J. Coastal erosion and land loss: Causes and impacts// Wright L, Nichols C. Tomorrow's Coasts: Complex and Impermanent. Cham: Springer, 2019: 137-150.

14 温家洪, 袁穗萍, 李大力, 等. 海平面上升及其风险管理. 地球科学进展, 2018, 33(44): 350.

15 Allen J T, Giammanco I M, Kumjian M R, et al. Understanding hail in the Earth System. Reviews of Geophysics, 2020, 58(1): e2019RG000665.

16 Wang S J, Zhou L Y, Wei Y Q. Integrated risk assessment of snow disaster (SD) over the Qinghai-Tibetan Plateau (QTP). Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 740-757.

17 王欣, 刘时银, 丁永建, 等. 中国喜马拉雅山冰碛湖溃决灾害评价方法与应用研究. 北京: 科学出版社, 2016.

18 刘时银, 张勇, 刘巧, 等. 气候变化对冰川影响与风险研究. 北京: 科学出版社, 2017.

19 Carrivick J L, Tweed F S. A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods. Global and Planetary Change, 2016, 144: 1-16.

20 Shiklomanov N, Streletskiy D, Nelson F. Northern hemisphere component of the Global Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Program// Proceedings of the 10th International Conference on Permafrost. Salekhard: The Northern Publisher, 2012: 377-382.

21 Raynolds M K, Walker D A, Ambrosius K J, et al. Cumulative geoecological effects of 62 years of infrastructure and climate change in ice-rich permafrost landscapes, Prudhoe Bay Oilfield, Alaska. Global Change Biology, 2014, 20: 1211-1224.

22 左常圣, 范文静, 邓丽静, 等. 近60年渤黄海海冰灾害演变特征与经济损失浅析. 海洋经济, 2019, 9(2): 50-54.

23 Wahl T, Haigh I D, Nicholls R J, et al. Understanding extreme sea levels for broad-scale coastal impact and adaptation analysis. Nature Communications, 2017, 8: 16075.

24 毛淑君, 李栋梁. 基于气象要素的我国南方低温雨雪冰冻综合评估. 冰川冻土, 2015, 37(1): 14-26.

25 温家洪, 石勇, 杜士强, 等. 自然灾害风险分析与管理导论. 北京: 科学出版社, 2018.

Characteristics, Influence of Cryosphere Disaster and Prospect of Discipline Development

WANG Shijin[1]　WEN Jiahong[2*]

（1 State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China；

2 School of Environmental and Geographical Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China）

Abstract Cryosphere disasters include continental cryosphere disaster, marine cryosphere disaster, and aerial cryosphere disasters and these disasters are widespread and have caused great loss and influence. With the increasing frequency and intensity of cryosphere disasters caused by climate warming, the cryosphere region faces severe challenges in poverty eradication, climate change mitigation and adaptation, and sustainable economic and social development. Early cryosphere disaster studies mainly focus on the disaster events, disaster effects, and prevention of single disaster, concentrating on avalanche, glacial lake outburst, and glacier debris flow disasters. Since the 1980s, the research scope of cryosphere disaster science is gradually expanding, some of cryosphere disaster received extensive attention and further research such as permafrost disasters, sea ice disasters, and ice jam/flood disaster. In recent 10 years, with the establishment and improvement of cryosphere science system, the discipline system of cryosphere disaster science is developing and making significant progress in cryosphere disaster risk, impact and adaptation. Based on previous studies, this paper elaborates on the connotation of cryosphere disaster science, reviews the spatiotemporal characteristics of cryosphere disaster and its comprehensive influence, and then puts forward some suggestions on the construction and development of cryosphere disaster science in the future.

Keywords cryosphere disaster, discipline construction, future prospect



王世金　中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室副研究员，中国科学院玉龙雪山冰川与环境观测研究站站长。主要从事冰冻圈灾害风险评估与管控研究。出版专著4部，参编10部。第一作者发表论文50余篇。E-mail: wangshijin@lzb.ac.cn

WANG Shijin　Associate Professor of State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences (CAS). He is the Director of Yulong Snow Mountain Glacier and Environment Observation and Research Station, CAS. He mainly engages in risk assessment and management research of cryosphere disaster. He has published 4 monographs and edited 10 monographs. He has also published more than 50 first authored journal articles.

E-mail: wangshijin@lzb.ac.cn

* Corresponding author



温家洪　上海师范大学环境与地理科学学院教授，上海灾害风险评估与管理研究中心主任。主要从事冰冻圈与可持续发展、灾害风险分析与管理、遥感与地理信息系统（GIS）应用研究。E-mail: jhwen@shnu.edu.cn

WEN Jiahong　Professor at School of Environmental and Geographical Sciences, Shanghai Normal University. His research focuses on cryosphere and sustainable development, disaster risk analysis and management, remote sensing and GIS application. E-mail: jhwen@shnu.edu.cn

■责任编辑：张帆